

总策划：魏 刚
主 编：马伟明



海军新军事变革丛书

Adaptive Blind Signal and Image Processing

自适应盲信号与图像处理

[波兰] Andrzej CICHOCKI 著
[日本] Shun-ichi AMARI

吴正国 唐劲松 章林柯 等译
张丽清 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



Copyright © 2002 by John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本书英文版由 John Wiley & Sons 公司出版, 该公司已将中文版独家版权授予中国电子工业出版社及北京美迪亚电子信息有限公司。未经许可, 不得以任何形式和手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2004-3474

图书在版编目 (CIP) 数据

自适应盲信号与图像处理/ (波) 西考克 (CICHOCKI, A.) 等著; 吴正国等译. —北京: 电子工业出版社, 2005.5

(海军新军事变革丛书)

书名原文: Adaptive Blind Signal and Image Processing

ISBN 7-121-01111-5

I. 自… II. ①西… ②吴… III. ①信号处理②图像处理 IV. ①TN911.7
②TP391.41

中国版本图书馆CIP数据核字 (2005) 第031861号

责任编辑: 徐云鹏 朱 巍

印 刷: 北京天竺颖华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

北京市海淀区翠微东里甲 2 号 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 850×1168 1/32 印张: 21.75 字数: 580 千字

印 次: 2005 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

海军新军事变革丛书

丛书总策划：魏 刚

编委会主任：马伟明

编委会副主任：文宏武 李敬辉 曹跃云 贲可荣

编委会委员：（以姓氏笔画为序）

马曲立 王公宝 王永生 王永斌

王德石 朱建冲 朱 锡 何 琳

吴正国 张永祥 张明敏 郁 军

高 俊 察 豪 蔡志明

选题指导：徐 韬 唐宗礼 秦 航 胡 颀

裴晓黎

出版策划：卢 强 吴 源

自适应盲信号与图像处理

主 审： 张丽清

副主审： 陈福胜

主 译： 吴正国 唐劲松 章林柯

审 稿： 李开生 黄 勇

翻 译： 欧阳华 石 敏 李 辉

赵申东 金广文 汤智胤

谢剑波 鲍晓静 赵 坤

阎春旭

《海军新军事变革丛书》总序

进入21世纪，一场世界性的新军事变革以前所未有的深度和广度迅猛发展。这场变革以信息技术的飞速发展是直接动力，以军事技术的变革、军事理论的创新和军队体制结构的调整改革为核心内容，目标是把工业时代的机械化军队建设成为信息时代的信息化军队，使战争形态加速向信息化演变。因此，新军事变革是军事领域一次新的历史性飞跃，在世界军事史上具有划时代的意义。

党的十六大报告明确指出，国防和军队建设要“适应世界军事变革的趋势”，“努力完成机械化和信息化建设的双重历史任务”。新军事变革的深入发展，已经深刻改变了世界军事领域的面貌。认真研究它的内在规律，探索信息化战争的制胜之道，实现我军现代化建设的跨越式发展，是我们面临的现实而紧迫的历史性任务。面对新军事变革的浪潮，我们必须更新思想观念，开阔视野，时刻关注世界军事领域发生的深刻变化，准确预测世界军事发展的趋势，从我国的国情军情出发，牢牢把握军事变革的方向，加速推进中国特色的军事变革，不断提高人民海军现代化作战能力。

古人云：兵者，国之大事。死生之地，存亡之道，不可不察。中国是濒海大国，海上方向的防御是国防的重要组成部分。建设一个强大的国防，建设一支强大的海军，关系到民族的荣辱和国家的兴衰。中国近代屡遭列强来自海上的侵略，几乎所有的重要港口、岛屿和沿海地区，都曾受到外敌蹂躏。惨痛的历史告诫我们，军事上落后必然使国家遭受耻辱，没有海上安全就没有国家安全。海军

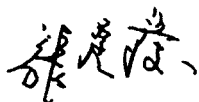
是一个国际性战略军种，担负着维护国家海洋权益、保卫国家海上安全的重要使命。我们必须看到，在世界性新军事变革中，战争形态已经发生了深刻变化，海军的作战和建设也出现了一系列新的特点。对此，我们应在密切关注的同时，深入研究信息化条件下的海军作战思想、武器装备、体制编制、教育训练和后勤保障，发展和创新海军作战理论，在推进中国特色的军事变革过程中完成机械化和信息化建设的双重历史任务。

江主席指出，在当今世界，任何一支军队，如果关起门来搞建设，拒绝学习国外先进的东西，是不可能实现现代化的。世界新军事变革的大潮来势猛、发展快。各军事强国纷纷加快军队的信息化建设，抢占战略制高点，虽然从总体上看，目前新军事变革还处在初级阶段，但外军在新军事变革中积累了一些有益的经验。同时，现代科学技术在国际间的迅速转移和相互渗透，为我们准确把握世界科技发展前沿、吸收最新科研成果提供了有利条件，也为我们最大限度地发挥后发优势、在自力更生的基础上跨越某些技术上的发展阶段、加快人民海军的现代化建设提供了机遇和可能。海军是技术与知识高度密集的军种，海军建设有其内在规律。我们在推进海军的军事变革时，必须坚持自主创新，同时大胆借鉴和吸收国外最新军事科研成果和先进经验，在借鉴和创新中实现“跨越式”发展。

发展与创新中很重要的方面是了解世界，面向未来。信息化战争从一定意义上来说，既是武器装备等物质条件的对抗，更是知识与观念等精神力量的较量。美国著名思想库兰德公司的军事研究专家马歇尔曾提出，未来“我们面临的首要挑战是知识的挑战”。夺取未来战争的战略主动权，必须依靠先进的科学技术和先进的军事理论。近年来，国外出版了许多研究新军事变革的著作和技术文献。把这些新的研究成果介绍给国内读者，有益于我们学习和借鉴外军的先进经验。海军装备部与海军工程大学组织专家编著翻译出版的

这套海军新军事变革丛书，以翻译国外海军先进技术和理论著作为主，出版海军军内自编教材和专著为辅，对世界海军在新军事变革中推出的研究成果进行了系统介绍。这是一项很有意义的工作。在此我谨对参与这项工作的各位专家表示感谢。同时对各位译、著者在笔耕之劳中付出的心血表示敬意。希望这套丛书能够对推进中国特色的军事变革，加快人民海军的信息化建设发挥积极的借鉴与参考作用。

中央军委委员
海军司令员

Handwritten signature in black ink, likely belonging to Zhang Dingde, the Chairman of the Central Military Commission and Commander of the Navy.

二〇〇四年七月十八日

译者序

盲信号处理(BSP)是目前信号处理中最热门的新兴技术之一,它具有稳定的理论基础和许多方面的应用潜力。事实上,BSP已成为重要的研究课题,并在许多领域得到发展,尤其是在雷达、声呐、遥感、通信系统、噪声控制、医学成像等领域。盲信号处理技术在我军尤其是海军新军事装备中的推广应用必将大大提高该装备在信息作战条件下的战术技术性能。

盲信号处理技术原则上不利用任何训练数据,也没有关于卷积、滤波、混合系统参数的先验知识。BSP包括三个主要方向:盲信号分离和提取、独立分量分析(ICA)以及多通道盲解卷积和均衡,它们是本书的主要内容。本书从理论和实践的角度提供了自适应盲信号处理技术和算法的广泛内容,其主要目的是推导和介绍在实践中工作良好的有效、简单的自适应算法;并尽量以通用或灵活的方式介绍概念、模型和算法,以便能在特殊应用中采用这些方法和算法。

由于盲信号处理技术是一种新兴的并正在不断发展的技术,其专著在国内外极为少见。本书原著者都是在盲信号处理技术方面有很深造诣并做出了重大贡献的学者。他们将自己研究的成果及许多散见在许多科学杂志和国际会议论文集上的研究结果系统地收集起来,并以统一的格式在本书中加以介绍,并在书后附有一千多篇参考文献。因此,我们特将此书翻译成中文介绍给广大读者。本书中译本的出版必将推动我国盲信号处理技术的发展和推广应用。

本书适合于高年级的本科生、研究生以及从事雷达、声呐、噪声控制、通信、电子、计算机科学等多个领域的工程技术人员阅读。

本书第1、2、11、12、13、14章由章林柯博士负责翻译,第3、4、5、6章由唐劲松教授负责翻译,第7、8、9、10章由吴正国教授负责翻译并负责全书统稿。本书还特别邀请在盲信号处理领域取得了许多重要成果的张丽清博士主审。提供译稿的还有欧阳华、石敏、李辉、赵申东、金广文、汤智胤等人。译者特别感谢原著者亲自为本书作序,感谢张丽清博士对本书的认真审校及所提出的许多宝贵意见。《海军新军事变革丛书》编委会、电子工业出版社的各级领导和编辑为本书的出版也付出了辛勤的劳动,借此机会,一并表示我们诚挚的谢意。本书由于篇幅较大、内容涉及面广,加之时间仓促、译者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

中文版前言

登高山以见低谷

磨刀不误砍柴功

中国谚语

盲信号处理(BSP)是目前新出现的技术研究领域,它有坚实的理论基础和许多潜在的应用。在不知道传输信道特征和真实源信号的情况下,从传感器阵列中分离或提取源信号的问题可以表述为盲源分离(BSS)或相关的广义分量分析(GCA)方法,这些方法包括独立分量分析(ICA)(及其扩展)、稀疏分量分析(SCA)、非负矩阵因式分解(NMF)、时频分量分析(TFCA)和多通道盲解卷积(MBD)。但是,BSP并不仅限于ICA或BSS。当传播系统的信息及其输入受到限制或未知时使用BSP,我们的目的在于发现和证实支配输入(未知量)和输出(观测量)之间的关系的规律或准则。BSP包含了许多重要的问题,像未知系统信道的盲辨识,或将信号适当分解为基本的潜在的(隐藏)分量,这些分量不一定总是能够代表真实的源信号,但是能代表真实源信号的特征或是子分量。

一本书被翻译成另外一种语言表明这本书具有重要的影响力。鉴于一大批优秀和热心的中国学者对这一新兴的领域感兴趣并致力于对它的研究,我们很高兴我们的书被译成中文。我们尤其要感谢本书的中译本的译者吴正国教授、唐劲松教授及其翻译组和审阅者张丽清教授,张教授同时为本书一些章节(特别是第9章到第11章)贡献了许多研究成果。

本书受到了读者好评的另一征兆是,在2003年4月本书做了重

要修订和勘误并进行了第二次印刷后,出版社还希望出版新的版本。

并且,最近两年我们很幸运地从同行、合作者和读者中收到了令人兴奋的反馈。知道如此多的人们欣赏本书,更重要的是知道他们使用本书后解决了他们自己的实际问题,这是令人振奋的。我们非常欢迎听到鼓励的话和批评意见,这其中包括极少数的印刷错误和其他错误。很高兴借这个机会感谢那些抽出时间阅读本书,并与我们共同分享他们对本书的思考结果的每一位读者——他们对我们工作给予了莫大的帮助。同时感谢对本书的不同章节和相关软件包ICALAB(见 <http://www.bsp.brain.riken.jp/ICALAB>)通过电子邮件给出评述的上百位读者。在最近几年中,许多中国科学家和研究者对独立分量分析、稀疏分量分析、盲源分离和多通道盲解卷积和均衡的发展做出了卓越的贡献。让我们介绍其中的几位:上海交通大学的张丽清教授,广州华南理工大学的李远清教授、谢胜利教授,香港中文大学的徐雷教授和王钧教授,中国台湾清华大学的 Chong-Young Chi 教授,东南大学的何振亚教授,西安电子科技大学的张贤达教授,复旦大学的陈天平教授,美国圣母大学的 Rueywen Liu 教授。许多在海外工作的杰出的中国研究者也对该领域做出了贡献,他们有 Lang Tong, Yingbo Hua, Zhi Ding 和 Sun-Yuan Kung。这份名单当然应该更长并包括许多年轻的中国研究者,但是篇幅有限,就无法在这里列举所有对该领域做出贡献的中国科学家了。这在 1300 多篇参考文献中可以集中体现出来。

和英文版一样,如果中国读者能够发现这本书信息量饱满、能够启发思考、激励学习并充满挑战性,我们的目的也就达到了。

Andrzej CICHOCKI, Shun-ichi AMARI
东京, 2004 年 11 月 15 日

前 言

信号处理一直在科学、技术以及诸如计算机断层扫描(包括PET、fMR、IEEG/MEG、光学记录仪)、无线通信、数码相机、高清晰度电视等新系统的发展中扮演着十分重要的角色。随着对记录和可视系统的质量与可靠性要求的提高,信号处理将扮演更重要的角色。

盲信号处理(BSP)是目前信号处理中最热门的新兴学科之一,它具有可靠的理论基础和许多方面的应用潜力。事实上,BSP已成为重要的研究课题,并在许多领域得到发展,尤其是在生物医学工程、医学成像、语音增强、遥感、通信系统、地震探测、地球物理学、计量经济学、数据挖掘等领域。盲信号处理技术原则上不利用任何训练数据,也没有关于卷积、滤波、混合系统参数的先验知识。BSP包括三个主要方向:盲信号分离和提取、独立分量分析(ICA)以及多通道盲解卷积和均衡,这是本书的主要内容。在这些领域近年来的研究成果是启发式的概念和思想与严格的理论和实验的完美组合。

不同领域的研究者通常对BSP的不同方面感兴趣。例如,神经科学家和生物学家对无导师学习的具有生物意义神经网络模型的发展感兴趣。另一方面,他们需要能从被大量的噪声和干扰污染的混合生物医学源信号中分离并提取出有用信息的可靠的方法和技术,例如,利用非侵入的方法记录人类大脑的活动(如利用EEG或MEG),以便了解大脑具有感觉、识别、存储、回忆模式以及包括联想、抽象、泛化等重要学习方式的能力。第二类研究群体——工程师和计算机科学家,主要是对可能用VLSI技术的硬件和计算方法实现的简单模型感兴趣,而建立这种简单模型的目的是为实际的工程和科学应用建立一套灵活、有效的算法。第三类研究群体——数学

家和物理学家,他们的兴趣在于研究基础理论,以便理解提出的算法的机理、特征和功能,并将之推广到更复杂的模型中去。各群体间的相互作用促进了 BSP 这种多学科交叉研究取得的实质性的进展,并且各群体互惠互利。

围绕 BSP 建立起来的理论十分广泛,其应用是多方面的,我们当然不可能在本书中覆盖所有领域。我们选择了能反映我们的背景和近十年来我们自己在该领域的研究兴趣和结果的内容。我们只是想对其他关于 BSP 的书进行补充,而并非要与它们竞争。本书从理论和实践的角度提供了自适应盲信号处理技术和算法的广泛内容,其主要目的是推导和介绍对处理实际数据工作具有良好效果且实现简单的自适应算法。事实上,本书中讨论的大部分算法已在 MATLAB 中实现,并得到了广泛的验证。我们尽量以通用或灵活的方式介绍概念、模型和算法以激励读者在理解新方法上具有创新性,并能在他们的特殊应用中采用这些方法和算法。

本书既是一本教科书,又是一本专著。说它是一本教科书,是因为它对 BSP 的基本模型和算法做了详细的介绍。它同时又是一本专著,是因为它提出了一些新的结论和思想并进一步发展和解释现有算法。这些内容第一次被收集在一起,并以图书的形式发表。而且,先前零散发表在许多科学杂志和国际会议论文集上的研究结果被系统地收集,并以统一的格式在本书中加以介绍。由于该书双重的特点,它适合于高年级的本科生、研究生以及从事生物医学工程、通信、电子、计算机科学、财政、经济、最优化、地球物理学和神经网络领域研究的工程师、科学家阅读。而且,本书也适合从事不同科学领域的研究者阅读,因为书中包括大量有利于他们做进一步研究的结果和概念。可按顺序阅读此书,但也并不必要,因为每一章节是相对独立的、尽可能少地交叉引用。因此,建议自由浏览本书。

致 谢

对在本书撰写过程中提供各种直接和间接帮助的研究人员,笔者深表谢意。

首先,我们对日本脑科学研究所所长 Masao Ito 教授表示我们最真挚的谢意,他为多学科研究创造了十分重要的科学环境并促进了国际间的相互协作。

尽管本书的部分内容源自于本书两位作者在该课题上近十年的研究工作,但众多有影响的结论和知名方法都是通过我们的同事、脑科学研究所及世界上其他几所大学共同合作而得到的。他们中有许多人做出了非常重要的贡献。在此特别要感谢日本高级脑信号处理(BSI)实验室的张丽清(Liqing Zhang);西班牙塞维利亚大学 E. S. Ingenieros 的 Sergio A. Cruces-Alvarez; Pohang 科技大学 (POSTECH) 计算机科学与工程系的 Seungjin Choi; 美国 Southern Methodist 大学的 Scott Douglas。

本书的某些部分是基于我们和我们同事间的紧密合作而完成的。第 9~11 章的内容部分是基于和张丽清(Liqing Zhang)的合作,他做了重要的贡献。第 7~8 章基于和 Sergio A. Cruces-Alvarez 及 Scott Douglas 的合作。第 5 章的内容部分是基于和 Ruck Thawonmas, Allan Barros, Seungjin Choi 及 Pando Georgiev 的合作。第 4 章和第 6 章的一部分是由 Seungjin Choi 和 Adel Belouchrani 合作完成的。第 2.6 节研究的总体最小二乘问题部分是基于与 John Mathews 的合作。

我们也一并对以前及现在的合作者表示深深地感谢: Seungjin Choi, Sergio Cruces, Wlodzimierz Kasprzak, Liqing Zhang, Scott

Douglas, Tetsuya Hoya, Ruck Thawonmas, Allan Barros, Jianting Cao, Yuanqing Li, Tomasz Rutkowski, Reda Gharieb, John Mathews, Adel Belouchrani, Pando Georgiev, Ryszard Szupiluk, Irek Sabala, Leszek Moszczynski, Krzysztof Siwek, Juha Karhunen, Ricardo Vigario, Mark Girolami, Noboru Murata, Shiro Ikeda, Gen Hori, Wakako Hashimoto, Toshinao Akuzawa, Andrew Back, Sergiy Vorobyov, Ting-Ping Chen 及 Rolf Unbehauen, 本书提出的许多思想由他们所做的工作而推动并发展。

在本书撰写的不同阶段, 一些人热心地阅读并评论了本书的部分或全部内容。我们十分感谢 Jonathon Chambers, Farid Hamzei-Sichani, Tariq Durrani, Chong-Yung Chi, Joab Winkler, Tetsuya Hoya, Wlodzimierz Kasprzak, Danilo Mandic, Yuanqing Li, Liqing Zhang, Pando Georgiev, Wakako Hashimoto, Fernando De la Torre, Allan Barros, Jagath C. Rajapakse, Andrew W. Berger, Seungjin Choi, Sergio Cruces, Jim Stone, Stanley Stansell, Carl Leichner, Khurram Waheed 及 Gordon Morison 给出了意义深远的评论和建议。

感谢那些所做的工作对本书中有重要影响并在文中反映出来的人们, 包括 Yujiro Inoue, Ruey-wen Liu, Sergio A. Cruces-Alvarez, Lang Tong, Scott Douglas, Jean-Francois Cardoso, Yingboo Hua, Zhi Ding, Chong-Yung Chi, Jitendra K. Tugnait, Erkki Oja, Juha Karhunen, Aapo Hyvarinen, Jonathon Chambers 及 Noboru Murata。

最后, 必须感谢我们的家人在我们完成该项目的过去两年里的帮助和理解。

A. CICHOCKI 和 S. AMARI

日本东京

目 录

第 1 章 盲信号处理导论:问题及应用	1
1.1 问题的表达——概述	1
1.1.1 一般盲信号处理问题	1
1.1.2 瞬时盲源分离和独立分量分析	4
1.1.3 有噪数据的独立分量分析	16
1.1.4 多通道盲解卷积和盲分离	18
1.1.5 信号的盲提取	22
1.1.6 广义多通道盲解卷积——状态空间模型	24
1.1.7 非线性状态空间模型——半盲信号处理	27
1.1.8 为什么要建立状态空间解混合模型	28
1.2 盲信号处理和半盲信号处理的潜在应用	30
1.2.1 生物医学信号处理	30
1.2.2 胎儿和母体心电图信号的盲分离	33
1.2.3 EMG 信号的增强和分解	33
1.2.4 EEG 和 MEG 数据处理	34
1.2.5 ICA/BSS 在多传感器生物医学信号中 噪声和干扰抵消的应用	38
1.2.6 “鸡尾酒会”问题	43
1.2.7 数字通信系统	45
1.2.8 图像恢复和理解	47
第 2 章 解线性代数方程系统及相关问题	53
2.1 线性方程系统问题的表述	53
2.2 最小二乘问题	56

2.2.1	最小二乘解的基本特性	56
2.2.2	加权最小二乘和最优线性无偏估计	58
2.2.3	基本网络结构最小二乘准则	60
2.2.4	大系统和稀疏系统的迭代并行算法	60
2.2.5	具有非负约束的迭代算法	63
2.2.6	稳健准则和迭代重加权最小二乘算法	67
2.2.7	Tikhonov 正则化和 SVD	71
2.3	线性方程系统的最小绝对偏差(1-范数)解	76
2.3.1	应用平滑近似和正则化的神经网络结构	77
2.3.2	基于抑制原理求解 LAD 问题的神经网络模型	80
2.4	总体最小二乘和数据最小二乘问题	84
2.4.1	问题的表述	84
2.4.2	总体最小二乘估计	87
2.4.3	自适应广义总体最小二乘	91
2.4.4	适用于相关噪声的扩展 TLS 法	94
2.4.5	示例——根据点集拟合直线	97
2.5	稀疏信号表示和最小 1-范数解	99
2.5.1	用迭代 LS 法获得最小 p -范数问题的近似解	101
2.5.2	稀疏表示法的惟一性和最优解	104
2.5.3	FOCUSS 算法	104
第 3 章	主/次分量分析及相关问题	109
3.1	简介	109
3.2	PCA 的基本性质	110
3.2.1	特征值分解	110
3.2.2	样本协方差矩阵的估计	112
3.2.3	信号和噪声子空间 — PCA 维数	